

胡宇航,张峰.基于视觉图像的震区人员搜救方法研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1356-1361.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1356

HU Yuhang,ZHANG Feng,Research on Personnel Search-and-rescue Method in Earthquake Area Based on Visual Imagery[J]. China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1356-1361.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1356

基于视觉图像的震区人员搜救方法研究

胡宇航¹,张峰²

(1.河北旅游职业学院信息技术系,河北承德067000;2.河北大学信息与科学学院,河北保定071002)

摘要:传统基于信号传感技术的震区人员搜救方法,利用惯性导航传感技术融合移动距离和方向角对待搜救人员进行定位,容易受到天气状况不理想以及局部遮挡的影响,其搜救效率和精度低。提出基于视觉图像的震区人员搜救方法,利用图像采集设备采集震区初始视觉图像,采用小波降噪法降噪处理,提升可辨程度。通过色彩对比方法提取降噪后震区人员视觉图像的特征,并与震区原始图像特征对比,获取震区待搜救人员候选图像;根据候选图像分别采用Kalman滤波跟踪算法和Mean shift跟踪算法,在天气状况不理想以及局部遮挡的复杂震区环境中跟踪搜救人员目标。实验结果表明,所提方法查全率保持在98.5%以上,平均准确率约为98%,人员搜救平均时间约为23s,说明所提方法能够进行高效、准确的震区人员搜救。

关键词:视觉图像;震区;人员搜救;图像特征;色彩对比度;跟踪算法

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)06-1356-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1356

Research on Personnel Search-and-rescue Method in Earthquake Area Based on Visual Imagery

HU Yuhang¹, ZHANG Feng²

(1.Department of Information Technology, Hebei Tourism Vocational College, Chengde 067000, Hebei, China;

2.College of Mathematics and Information Science, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China)

Abstract: Traditionally, inertial navigation sensor technology, based on signal sensing technology, has been used to locate search-and-rescue personnel by combining the distance they have moved with their angle of direction. This method is easily affected by poor weather conditions and partial occlusion, and the resulting search-and-rescue efficiency and accuracy are low. In this paper, we propose a new search-and-rescue method based on visual imagery for victims in earthquake areas. Initial visual images of the seismic area are collected by image acquisition equipment, and the wavelet denoising method is used to reduce the noise and improve the discernibility of the images. Then, after noise reduction, the visual image features of people in the seismic area are extracted using the color contrast method, and compared with the original image features of the seismic area, to obtain candidate images of rescuers in the seismic area. According to these candi-

收稿日期:2018-08-20

基金项目:国家自然科学基金(F020508);2017年度河北省高等学校人文社会科学研究指导项目(SZ17099)

第一作者简介:胡宇航(1982-),女,河北承德人,硕士研究生,讲师,研究方向:计算机图像处理,计算机应用技术。E-mail:18631411650@163.com.

通信作者:张峰(1976-)女,山东泰安人,博士,副教授,研究方向:模糊信息处理,人工智能。

date images, a Kalman-filter tracking algorithm and a mean-shift tracking algorithm are used to track search-and-rescue personnel in complicated seismic areas during poor weather conditions and partial occlusion, respectively. The experimental results show that the recall rate of the proposed method is above 98.5%, the average accuracy is about 98%, and the average search-and-rescue time is about 23 s. These results indicate that the proposed method can efficiently and accurately locate victims for search-and-rescue operations in seismic areas.

Keywords: visual image; seismic area; personnel search and rescue; image features; color contrast; tracking algorithm

0 引言

近些年,国内外地震频发,且大地震灾害强度大,国内研究者也对其进行不断探索^[1],这就为地震搜救带来了新的课题。现有的搜救方法无法适应震区环境的复杂多变^[2],导致原本有生还可能的待搜救人员因错失最佳搜救时间而丧失宝贵生命。因此研究一种可以准确、高效对震区人员实施搜救的方法势在必行。

当前震区人员搜救方法研究较多,也存在较多问题,例如文献[3]提出了一种利用惯性导航传感技术对震区废墟缝隙进行人员搜救的方法,其未考虑复杂的地下环境与天气状况,导致搜救目标跟踪定位结果精度低。文献[4]设计并实现了一种具有体征监测功能的 UAV 搜救系统,利用救援信标机和 ECG 体征监测仪对待搜救人员的体征进行定位监测,由于待搜救人员身上需随时佩戴 ECG 体征监测仪,所以此系统只适用于特定环境,实用性较低。文献[5]设计了基于微惯性传感器的灾区搜救系统,通过数据采集与处理等过程对灾区人员进行搜救,对待搜救人员重要特征点扫描不全面,无法校正不合理特征,搜救效率较差。文献[6]提出一种结合 ORB (oriented FAST and rotated BRIEF) 特征检测算子和局部敏感哈希 (locality-sensitive hashing, LSH) 特征关联算法对待搜救人员进行定位,但其受外部噪声干扰严重,人员搜救效率差。

随着科学技术的发展与计算机网络技术的成熟,视觉图像以其实时性、自主分析能力的优势,已经逐渐成为人们应对突发事件、紧急事件的首选技术之一。针对上述文献中存在的各种问题,提出基于视觉图像的震区人员搜救方法,其能够适应天气状况不理想的环境以及局部遮挡的环境,对震区人员进行准确跟踪搜救,提高震区人员搜救质量。

1 基于视觉图像的震区人员搜救方法

1.1 震区环境下的视觉图像处理

初始震区人员视觉图像采集的过程中,应根据

震区实际环境,选择数量不等的视觉图像传感器、联网计算机和显示器作为图像采集设备^[7],采集到的震区人员视觉图像经由虚拟现实设备发送至显示器终端。以式(1)描述采集的视觉图像的像素特征数字方程:

$$A(\omega, m) = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\cos\left(\frac{\pi\omega^2}{D}\right) + \cos\left(\frac{\pi m^2}{D}\right) \right) \right) \times 255 \quad (1)$$

式中: A 表示采集到的初始震区视觉图像,其像素特征分别为 ω, m ; D 表示规范常量是计算机视觉特征采集的范数,本文方法内假定 $D=1\ 000$ 。震区人员视觉图像人员位置特征点如下:

$$\hat{x}^{0j}(l-1/l-1) = \frac{\sum_i^g \hat{x}^i(l-1/l-1)}{\omega_{i/j}(l-1/l-1)} \quad (2)$$

$$p^{0j}(l-1/l-1) = \sum_i^g u_{i/j}(l-1/l-1) \{ p^i(l-1/l-1) \times [\hat{x}^i(l-1/l-1) - \hat{x}^{0j}(l-1/l-1)] \times [\hat{x}^i(l-1/l-1) - \hat{x}^{0j}(l-1/l-1)]^T \} \quad (3)$$

式中: j 表示位置; l 表示位姿。对震区人员视觉图像像素特征实施均匀分割,以 $g_j(j=1, 2, \dots, g) \forall g^j \in G$ 表示分割维数,则震区人员视觉图像的位姿校正概率为:

$$\omega_j(l) = P(g_j(l)/z^l) = \frac{1}{c} P(z(l)/g_j(l), z^{l-1}) P(g_j(l)/z^{l-1}) = \frac{1}{c} \Lambda_j(l)_{c_j} \quad (4)$$

式中: P 表示校正概率; $g_j(l)$ 表示 g 维数下 j 位置的 l 位姿; z^l 表示 l 位姿的校正位置; $z(l)$ 表示新位置; c 表示图像总帧数。

依照震区人员视觉图像内的灰度像素值^[8]对第一帧图像的观测值进行运算,设定窗口大小为 3×3 ,结合灰度图像分解法,采集初始震区人员视觉图像。

1.2 视觉图像降噪处理

由于震区环境复杂,视觉图像采集环境较差,图像成像的粒度较多同时也较粗糙^[9],因此需要对采集到的初始震区人员视觉图像预处理,提高震区人员视觉图像质量,获取清晰可辨的震区人员视觉图形,为后续的震区人员搜救提供可靠的依据。

本文方法采用小波降噪法实现震区人员视觉图像的预处理^[10],以 $A\left(\frac{w-n}{20}, \frac{m-n}{20}\right)$ 表示震区人员图像的像素集,其中 n 为最佳像素维数,利用小波降噪法生成存在 $\frac{n}{20}$ 像素偏移的图像,其中 (i, j) 方位像素点的灰度值为 $X_{i,j}$,震区人员视觉图像降噪的母小波采用双曲调频小波,其函数为:

$$E = f(u, b) \quad (1)$$

式中: u 和 b 表示小波分量。

用 u_i 描述以 A_c 为中心的 $N \times N$ 维窗口,图像降噪输出的特征分解协方差矩阵为:

$$C = Q^T Q \begin{bmatrix} \sum H_x(t)H_x(t) & \sum H_x(t)H_y(t) \\ \sum H_y(t)H_x(t) & \sum H_y(t)H_y(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: Q 表示震区的主模方向; t 时间 x 、 y 方向特征分解值分别是 $H_x(t)$ 和 $H_y(t)$,且有:

$$Q = WSM^T \quad (7)$$

式中: W 和 M 分别表示 $N \times N$ 和 2×2 的矩阵; S 表示主模矩阵。通过上述图像降噪处理过程,能够有效提升震区人员视觉图像的可分辨程度。

1.3 搜救人员图像特征提取

获取清晰可辨的震区搜救区域图像后,采用色彩对比方法实施特征提取^[11]。色彩对比方法的基本原理是不同图像区域内的特征点权值存在一定差异性,利用视觉图像针对人眼对色彩的敏感度,提取图像特征内对比度较明显的部分。色彩对比方法同其他特征提取方法相比较,在计算准确率较高的同时,简化了计算过程。

在震区原始图像数据库内选取图像 I ,以式(8)描述其特征集合 H 的色彩对比度:

$$S(H) = \sum_{\forall H \in I} DIS(H_k, H_i) \quad (8)$$

式中: H_k 、 H_i 和 $DIS(H_k, H_i)$ 分别表示震区人员视觉图像特征、图像 I 内某特征以及两图像特征间的空间位移。快速整理图像 I 的特征能够提升搜救性能,因此在计算色彩对比度时需对特征集合 H 实施排序,即整理式(8),具体过程为:

$$S(H) = \sum_{i=1}^y f_{ki} DIS(r_k, r_i) \quad (9)$$

式中: y 、 r_k 、 r_i 和 f_{ki} 分别表示图像内的色彩数量、图像特征 H_k 的色彩集合、图像特征 H_i 的色彩集合以及 H_k 与 H_i 内 r_k 与 r_i 形成重叠的几率。利用式(9)可以按照相似度大小排列图像特征 H_k 与 H_i 内的色彩特征。

完成图像色彩相似度大小排列后,依照排列结果使用色彩对比度方法划分图像,获取区域色彩对比度 $S(d)$:

$$S(d) = \sum_{r_j \neq r_k} DIS(d_j, d_k) \quad (10)$$

式中: d_j 、 d_k 和 $DIS(d_j, d_k)$ 分别表示图像 I 的划分区域、震区人员视觉图像的划分区域和两划分区域间的位移。其中对 $DIS(d_j, d_k)$ 实施运算时可采用式(11):

$$DIS(d_j, d_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ki} DIS(r_k, r_i) \quad (11)$$

实施上述运算过程前,需先设置色彩对比度规范值。通过式(10)运算后可获取不同区域色彩对比度结果,再通过式(11)得到图像 I 的色彩对比度总值。对比图像 I 的色彩对比度总值和预先设置的规范值,若两值之间的差距大于 9%,那么图像 I 将成为震区待搜救人员的候选图像。

1.4 震区人员搜救图像跟踪方法

基于上小节获取的震区待搜救人员候选图像,分别采用 Kalman 滤波跟踪算法和 Mean shift 跟踪算法对搜救人员目标进行跟踪^[12]。Kalman 滤波跟踪算法运算简单快捷,具有较好的实时性,适用于天气状况不理想的环境中;Mean shift 跟踪算法作为迭代循环算法,对搜救目标模板判断过程中只需判断出局部就能进行准确的搜救目标跟踪,适用于局部遮挡的环境中。

1.4.1 Kalman 滤波跟踪算法设计

Kalman 滤波器的核心为递归估计算法^[13],对目标此刻情况进行估计的依据是目标前一时刻的情况及观测到的情况。采用 Kalman 滤波算法进行震区人员搜救跟踪的基本步骤为:

(1) 对前帧的搜救目标跟踪结果实施采集;

(2) 通过采集到的结果对此刻搜救人员目标的位置进行估计;

(3) 根据估计结果对搜救人员目标进行搜索。

假设在搜索范围内发现搜救目标,那么需接着对下一帧图像实施处理;若没有发现搜救目标,那么需将搜索范围不断加大,再次进行搜索,直至发现搜

救目标。假设 (x_0, y_0) 表示搜救目标的初始方位坐标,而搜救目标的速度无限接近 0,那么以式(12)描述初始化的状态向量:

$$\mathbf{X}_0 = (x_0, y_0, 0, 0) \quad (12)$$

运算噪声的协方差矩阵是四维单位矩阵,观测噪声的协方差矩阵是二维的单位矩阵。以 $\mathbf{Z}_k = [x_k, y_k]^T$ 表示观测状态向量,那么 (x_k, y_k) 表示 k 时刻内搜救目标方位坐标。搜救目标方位实施迭代搜索的依据是 Kalman 五个更新方程^[14]。

1.4.2 Mean shift 跟踪算法设计

采用 Mean shift 算法(均值漂移算法)进行搜救目标跟踪时,主要包括以下几个基本步骤:

第一步:收集搜救目标单帧图像,对搜救目标的所在区域进行判断,基于 1.3 节获取的图像特征,构建搜救目标模板,获取搜救目标特征 $q = \{q_u\}_{u=1,2,\dots,m}$,且有 $\sum_{u=1}^m q_u = 1, y_0$ 表示初始方位。

第二步:构建候选搜救目标模板,在获取候选搜救目标初始特征 $\rho_u(y_0)$ 时,需先对候选搜救目标特征 $\rho_u(y)$ 进行判断,再在其中融入上一帧的初始方位 y_0 。

第三步:根据 Bhattacharyya 系数 $\rho[\rho_u(y), q_u]$ 运算的结果,确定搜救目标模板与候选搜救目标模板间的相似度。运算加权值 $\{\tau_i\}_{i=1,2,\dots,m}$,防止各像素点对确定搜救目标的作用相同。

第四步:对搜救目标当前方位实施运算和更新时采用 Mean shift 向量和迭代过程;对搜救目标位置实施更新后,确定新目标特征与目标特征间的相似度 $\rho[\rho_u(y_0), q_u]$ 。

第五步:因为 Bhattacharyya 系数最小化的过程等同于欧几里得距离最大化的过程^[15],所以需比较 y_0 及 \hat{y}_1 方位的相似性系数。假设 y_0 方位的相似性小于 \hat{y}_1 方位,则再次寻找,直至找到满足 $\rho[\rho_u(y_0), q_u] < \rho[\rho_u(\hat{y}_1), q_u]$ 的方位。

第六步:利用容许参数 $\epsilon \geq 0$ 规范 y_0 方位和 \hat{y}_1 方位的坐标距离,由于各帧时间相差较小,搜救目标移动的速度也较小,因此当坐标距离大于容许参数时表示方位确定存在误差,再次实施迭代运算获取新的坐标距离。

第七步:若 y_0 方位和 \hat{y}_1 方位的坐标距离在容许参数范围内,那么继续跟踪搜救目标时循环第一至第六步骤;不继续跟踪搜救目标时输出运算结果,完成震区人员目标的有效搜救。

2 实验分析

利用 Visual.c6.0 软件输出相同实验环境下包括本文方法、基于惯性导航传感技术的震区人员搜救方法以及基于 ORB 和局部敏感哈希特征关联算法的震区人员搜救方法的搜救查全情况、搜救准确率变化情况以及搜救效率(图 1、图 2 和表 1)。

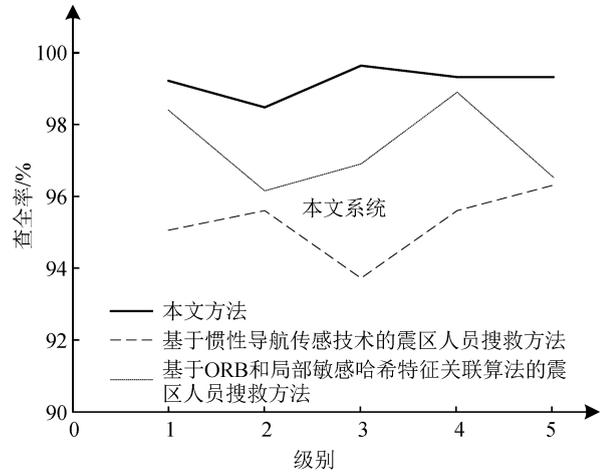


图 1 搜救查全情况对比图

Fig.1 Comparison between the search and rescue cases using different methods

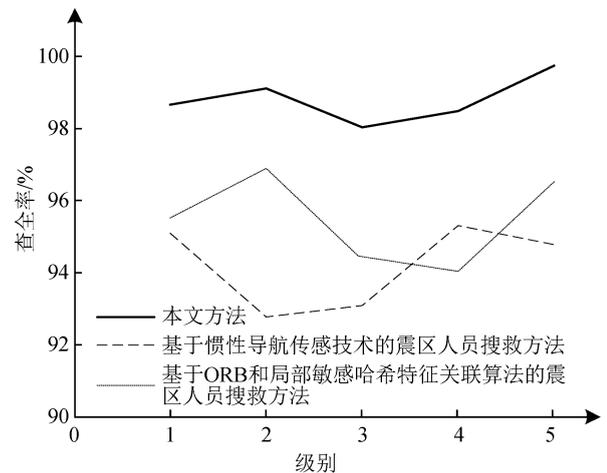


图 2 搜救准确率变化情况对比图

Fig.2 Comparison of search and rescue accuracy rates using different methods

对图 1 进行分析可知,使用本文方法进行搜救时对人员的查全情况要高于其他两个方法,查全率保持在 98.5% 以上;基于惯性导航传感技术的震区人员搜救方法的查全率在 93.5%~96.5% 间,基于 ORB 和局部敏感哈希特征关联算法的震区人员搜救方法的查全率在 96%~99% 间。实验结果说明,

表1 搜救效率比较结果

Table 1 Comparison results of search and rescue efficiency

实验组别	本文方法 所需时间/s	基于惯性导航传感技术的震区 人员搜救方法所需时间/s	基于 ORB 和局部敏感哈希特征关联算法的 震区人员搜救方法所需时间/s
1	20.23	75.34	53.26
2	24.02	82.01	64.71
3	23.02	85.06	66.34
4	25.58	79.33	57.09
5	22.41	78.6	52.77
平均时间	23.052	80.068	58.834

本文方法具有较高的搜救查全率。

由图2能够得到,本文方法的准确率平均值在98%左右,基于惯性导航传感技术的震区人员搜救方法的准确率平均值在94%左右,而基于ORB和局部敏感哈希特征关联算法的震区人员搜救方法的准确率平均值在95%左右,说明使用本文方法进行震区人员搜救的准确率较高。

结合图1和图2能够得到,本文方法的查全率和准确率均高于其他两个方法,说明本文方法在进行震区人员搜救时,能够确保图像特征点不丢失,进而提升查全率和准确率。

对表1进行分析可知,采用本文方法进行震区人员搜救所需的平均时间为23s左右,而基于惯性导航传感技术的震区人员搜救方法和基于ORB和局部敏感哈希特征关联算法的震区人员搜救方法所需的平均时间分别为80s和58s左右。结果表明使用本文方法进行震区人员搜救具有更高的搜救效率。

为了验证本文方法在提高震区人员搜救过程中视觉分析合理性的性能,分别采用本文方法和传统基于惯性导航传感技术的震区人员搜救方法,在相同的实验环境中获取震区人员搜救视觉测试的输出峰值信噪比结果,其对比情况如表2所列。

表2 不同方法输出峰值信噪比对比结果

Table 2 Comparison between peak signal to noise ratio of different methods

迭代次数 /次	噪声干扰强度					
	5 dB		10 dB		20 dB	
	传统方法输出 峰值信噪比/dB	本文方法输出 峰值信噪比/dB	传统方法输出 峰值信噪比/dB	本文方法输出 峰值信噪比/dB	传统方法输出 峰值信噪比/dB	本文方法输出 峰值信噪比/dB
1	2.73	3.16	4.21	4.46	7.55	7.49
5	4.12	4.39	5.83	6.30	8.84	9.57
10	4.46	4.75	6.32	7.75	10.02	10.93
15	4.52	4.87	6.43	8.14	10.16	11.47
20	4.66	5.08	6.56	8.61	10.32	11.88
25	4.81	5.37	6.70	8.99	10.50	12.36
30	4.93	5.62	6.84	9.37	10.63	12.80
35	5.05	5.88	7.02	9.61	10.77	13.31
40	5.13	6.20	7.10	9.89	10.92	13.82
45	5.20	6.51	7.20	10.22	11.04	14.18
50	5.26	6.62	7.29	10.44	11.13	14.46
平均值	4.62	5.31	6.50	8.53	10.17	12.02

对表2进行分析能够得到,在经过若干次迭代后,当噪声干扰强度为5dB时,传统方法输出峰值信噪比平均值为4.62dB,本文方法为5.31dB;当噪声干扰强度为10dB时,传统方法输出峰值信噪比平均值为6.50dB,本文方法为8.53dB;当噪声干扰强度为20dB时,传统方法输出峰值信噪比平均值为10.17dB,本文方法为12.02dB。对比分析这些实验数据结果说明,采用本文方法进行震区人员搜救时,能够有效提升输出峰值信噪比,增强震区人员搜救的效果。

3 结论

视觉图像作为一种图像识别技术,其根本是以人眼结构特点为导向,具有自适应、自优化的优势。传统震区人员搜救方法中存在的问题使其无法满足当下震区人员搜救的需求,因此提出基于视觉图像的震区人员搜救方法。为提升初始震区人员视觉图像的可辨性,本文方法采用小波降噪法对人员视觉图形进行降噪处理。利用色彩对比方法提取图像特征,获取待搜救人员候选图像后,根据复杂多变的震

区环境,分别采用 Kalman 滤波跟踪算法和 Mean shift 跟踪算法,对天气状况不理想的环境以及局部遮挡环境中的震区人员进行准确跟踪搜救。经实验证明,本文方法查全率、平均准确率、人员搜救平均时间分别为 98.5% 以上、98% 左右、23 s 左右,当噪声干扰强度为 5 dB、10 dB、20 dB 时输出峰值信噪比平均值分别为 5.31 dB、8.53 dB 和 12.02 dB,说明本文方法具有较高的准确性和效率,能够增强震区人员搜救的效果。

参考文献(References)

- [1] 郭安宁,郭增建,任栋,等.磁暴二倍法与异年倍九法相配对强震时间短临预测的震例验证研究[J].地震工程学报,2015,37(增刊2):152-156.
GUO Anning, GUO Zengjian, REN Dong, et al. Case Study of Impending Strong Earthquake Prediction Combining the Rhythm of Multiplied Nine Days in Different Years and Double Magnetic Storm Time Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(Supp2): 152-156.
- [2] 李红光,王利亚,孙刚,等.华北地区中小地震重新定位和地震活动特征研究[J].地震,2015,35(1):28-37.
LI Hongguang, WANG Liya, SUN Gang, et al. Seismicity Characterized by Relocation of Small to Moderate Earthquakes in North China[J]. Earthquake, 2015, 35(1): 28-37.
- [3] 邱亚,沈林勇,胡卫建,等.缝隙搜救机器人镜体的形状重建和定位方法[J].仪器仪表学报,2015,36(12):2782-2789.
QIU Ya, SHEN Linyong, HU Weijian, et al. Shape Rebuilding and Positioning Method of Search and Rescue Robot Endoscope in Ruin Crack[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2782-2789.
- [4] 李源,高嵩,阚媛珂,等.有体征监测功能的无人机野外搜救系统的设计[J].高技术通讯,2015,25(10-11):941-947.
LI Yuan, GAO Song, KAN Aike, et al. Design of an UAV Search and Rescue System with the ECG Monitor Function[J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(10-11): 941-947.
- [5] 苏菲,金志刚,王柄鉴.基于惯性传感器的便携式消防员搜救系统[J].计算机应用研究,2015,32(12):3677-3681.
SU Fei, JIN Zhigang, WANG Bingjian. Portable Fireman Search and Rescue System Based on Inertial Sensors[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(12): 3677-3681.
- [6] 原鑫,李擎,张昊,等.蛇形搜救机器人的 ORB-SLAM 研究[J].科学技术与工程,2016,16(31):229-233.
YUAN Xin, LI Qing, ZHANG Hao, et al. ORB-SLAM Research of Snake-like Rescue Robot[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(31): 229-233.
- [7] 郭继东,杨月巧.地震应急物资需求预测的模糊案例推理技术[J].中国安全生产科学技术,2017,13(2):176-180.
GUO Jidong, YANG Yueqiao. Study on Fuzzy Case-based Reasoning (FCBR) for Demand Forecast of Emergency Material in Earthquake[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(2): 176-180.
- [8] 王前锋.考虑时间约束的地震救灾数学模型设计与实现[J].地震工程学报,2018,40(4):853-858.
WANG Qianfeng. Design and Implementation of a Mathematical Model for Earthquake Disaster Rescue Considering Time Constraint[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 853-858.
- [9] 李琴,赵仕英,黄志强,等.可控震源振动器系统不确定性分析[J].中国安全生产科学技术,2016,12(8):158-164.
LI Qin, ZHAO Shiyong, HUANG Zhiqiang, et al. Uncertainty Analysis of Vibroseis Vibrator System[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(8): 158-164.
- [10] 梁永朵,姜金征,张文静,等.辽宁省地震重点监视防御区典型村镇房屋抗震现状调查与分析[J].世界地震工程,2018,34(3):103-110.
LIANG Yongduo, JIANG Jinzheng, ZHANG Wenjing, et al. Investigation and Analysis on the Seismic Status of Typical Rural Houses in the Key Earthquake Monitoring and Defending Regions in Liaoning Province[J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(3): 103-110.
- [11] 郭增建,郭安宁.基于震源机制的地震区划与地震预测方法讨论[J].地震研究,2017,40(4):509-513,677.
GUO Zengjian, GUO Anning. Seismic Zonation Based on Focal Mechanisms and Discussion on Earthquake Prediction Methods[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 509-513, 677.
- [12] 郭志宇,郭安宁,白雪见,等.基于视频监控系统的突发灾害应急评估技术可行性研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):122-127.
GUO Zhiyu, GUO Anning, BAI Xuejian, et al. Feasibility Study on Emergency Assessment Technology Of Sudden Disaster Based on Video Surveillance System[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(5): 122-127.
- [13] 任栋,郭安宁.“一带一路”所经陆路地域巨震链特征研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(10):48-52.
REN Dong, GUO Anning. Research on Characteristics of Massive Earthquake Chain in the Land Area of "the Belt and Road"[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(10): 48-52.
- [14] 胡进军,李天男,谢礼立,等.脉冲型地震动作用下典型珊瑚岛礁的场地放大研究[J].世界地震工程,2017,33(4):1-10.
HU Jinjun, LI Tiannan, XIE Lili, et al. Seismic Response Analysis of Coral Reef under Pulse-like Ground Motions[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(4): 1-10.
- [15] 周晓洁,梁清华,刘中宪,等.地震波斜入射下层状场地中地下综合管廊地震响应分析[J].世界地震工程,2018,34(3):32-45.
ZHOU Xiaojie, LIANG Qinghua, LIU Zhongxian, et al. Seismic Response Analysis of the Utility Tunnel in Layered Site under Obliquely Incident Seismic Wave[J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(3): 32-45.